РАЗДЕЛ V. НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Гриб Н.Н., Гриб Г.В., Качаев А.В., Малинин Ю.А., Мельников А.Е.
Изменение уровня сейсмической активности в Южной Якутии под воздействием
промышленных взрывов

*Академия наук Республики Саха
(Россия, Якутск)*

*Технический институт (филиал) Север-Восточного федерального университета им.
М.К. Аммосова*

*(Россия, Нерюнгри)
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова» СО РАН
(Россия, Якутск)*

doi: 10.18411/lj-03-2021-26

idsp: ljjournal-03-2021-26

Аннотация

В связи с высокой природной сейсмичностью Южно-Якутского региона, импульсные нагрузки при производстве промышленных взрывов оказывают прямое и косвенное воздействие на состояние верхней части земной коры. Прямое воздействие осуществляется за счет непосредственного влияния нелинейных смещений, вызванных взрывной волной, и образования новых нарушений. Косвенные воздействия происходят за счет активизации структурных элементов на геологических контактах, что приводит к появлению очагов техногенной сейсмичности. Очаги наведенной сейсмичности либо приурочены к пункту взрыва, либо располагаются вдоль тектонических структур, пересекающих карьерные поля. Техногенное воздействие на геологическую среду трансформировало самостоятельный локальный сейсмический процесс, под действием взрывов инициировался локальный поток сейсмических событий. Фрагментарно активизировались приповерхностные слои земной коры в зоне динамического влияния активных разломов. Под воздействием взрывов происходит изменение количества сейсмических событий и изменение среднего уровня высвобожденной энергии. Импульсные нагрузки на геологическую среду приводят к пространственному перераспределению очагов малоэнергетических ($K < 7$) землетрясений.

Ключевые слова: геологическая среда, локальная сейсмичность, массовые взрывы, техногенные землетрясения.

Abstract

Due to the high natural seismicity of the South Yakutia, impulse loads from industrial explosions have a direct and indirect impact on the upper Earth's crust. The direct effect is caused by the direct influence of non-linear displacement caused by the blast and the formation of new disturbances. Indirect effects occur through the activation of structural elements on geological contacts, resulting in the emergence of centres of technogenic seismicity. Hot spots of seismicity are either connected to the point of explosion or are located along tectonic structures that cross the quarry fields. Man-made impacts on the geological environment transformed an autonomous local seismic process, triggered by explosions by a local flow of seismic events. Fragmentary subsurface layers of the Earth's crust were activated in the zone of dynamic influence of active faults. Explosions change the number of seismic events and the average level of energy released. Impulse loads on the geological medium lead to the spatial redistribution of low-energy ($K < 7$) earthquake hotspots.

Key words: geological environment, local seismicity, mass explosions, man-made earthquakes.

Введение

Многолетние сеймотектонические исследования, проводимые на юге Сибири, на границе Евразийской и Амурской литосферных плит, установили формирование самостоятельной Олекмо-Становой зоны (ОСЗ), в пределах которой за 60 лет инструментальных наблюдений отмечено свыше 40 тысяч сейсмических событий с магнитудой от $M \geq 2.0$ до $M = 6.5-7.0$ [1]. В данной статье мы рассматриваем территорию, располагающуюся в центральной части ОСЗ, области активного освоения разнообразных полезных ископаемых в окрестностях г. Нерюнгри.

Возрастающие масштабы и интенсификация освоения земных недр в современных условиях привели к появлению двух проблем во взаимодействии человека и природы, а именно: необходимости решения задач по предотвращению чрезвычайных ситуаций катастрофического характера, вызванных техногенной сейсмичностью, и исследование возможности активного вмешательства в динамику природного сейсмического процесса техногенными воздействиями.

Возможность инициирования землетрясений исходит из гипотезы неустойчивого энергетического состояния земных недр. На основании этого в ряде работ [2-5] утверждается, что атомные взрывы приводят к изменению сейсмического режима даже на очень больших расстояниях (тысячи километров) от инициирующего воздействия.

С увеличением масштабов воздействия человека на окружающую среду характерно возрастание нагрузки не только на такие быстро реагирующие составляющие экосистем, как животный и растительный мир, почва, вода и воздух, но и на те компоненты, которые обычно считались не подверженными влиянию цивилизации [6]. К последним, как наиболее устойчивым, долгое время относили верхние слои земной коры и деформационные процессы, протекающие в них [7]. Традиционно считалось, что происходящие в земной коре многообразные деформационные процессы различного пространственно-временного масштаба, в том числе землетрясения, аномальные деформации в разломных зонах, просадки, оползни, сели и др., приурочены исключительно к орогеническим областям и смежным с ними районам. Однако в последнее время представления о современном геодинамическом состоянии недр радикально изменились. Многолетние работы на геодинамических полигонах показали, что деформационные процессы наблюдаются повсеместно и даже на древних платформах и в сейсмически спокойных регионах. Они проявляются, например, в форме интенсивных квазипериодических вертикальных и горизонтальных подвижек по разломам с амплитудами до 20–50 мм/год [8].

Опубликованные данные свидетельствуют о том, что даже в пределах наиболее древних платформенных областей могут происходить землетрясения с магнитудой $M > 7$ [9,10].

С увеличением масштабов антропогенного воздействия техногенная сейсмичность усиливается [11]. Очаги техногенных землетрясений имеют, как правило, небольшие глубины. Это повышает их опасность для зданий и сооружений: небольшие магнитуды землетрясений компенсируются близостью очагов к поверхности, так что относительно слабые техногенные землетрясения способны вызвать локальные катастрофы [12].

Наведенная сейсмичность в последние годы стала одной из проблем геозкологических последствий сейсмических эффектов от массовых взрывов, проводимых в горнодобывающих регионах [13-17].

Для условий Южной Якутии можно выделить следующие виды воздействия человека на природу, которые способны спровоцировать землетрясения: строительство водохранилища, открытые горные работы на разрезе «Нерюнгринский», подземные горные работы на угольных шахтах. В связи с высокой природной сейсмичностью и близостью промышленной зоны к г. Нерюнгри, антропогенные воздействия могут в

значительной степени влиять на уровень сейсмических и геоэкологических рисков. Практическая значимость решения обозначенных проблем для развивающегося Южно-Якутского региона чрезвычайно высока [18].

Экспериментальные исследования

Для оценки уровня техногенной сейсмичности в Южной Якутии анализировались данные сейсмологического мониторинга за период с 1 января 2002 года по 31 июля 2012 года. При сопоставлении сейсмологических данных с объемом взорванной горной массы установлена следующая закономерность: с увеличением объема взорванной горной массы увеличивается количество ближних землетрясений. Анализ выполнялся суммарно: объем взорванной горной массы за месяц сопоставлялся с количеством ближних землетрясений за месяц. В выборку были включены ближние землетрясения, с разницей прихода продольной (Р) и поперечной (S) упругих волн до 6 секунд (в радиусе до 50 км от зоны ведения взрывных работ), и произошедшие не позднее 10 часов после массового взрыва и объем взорванной горной массы за указанный период.

Степени влияния горных работ, проводимых в разрезе «Нерюнгринский», на индуцированную сейсмичность в ближней зоне ($1^0 \times 1^0$) оценена путем расчета высвобожденной энергии по годам (рис.1). Среднее значение энергии с 1979 по 2005 гг. находится в пределах от $K=9$ до $K=10$ {Дж}. В период 1989-90 гг., а также с 2003 г. отмечается пик высвобожденной энергии более $K=11$ {Дж}. Такой результат свидетельствует о том, что буровзрывные работы оказывают влияние на общий энергетический баланс сеймотектонического процесса, так как в этот же период на разрезе «Нерюнгринский» производился максимальный объем вскрышных и добычных работ [14].

Вместе с тем среднее значение энергии с 1962 по 2005 гг. по линейному тренду меняется от $E=10^{10.2}$ до $E=10^{9.8}$ Дж. Суммарная выделенная энергия по годам в период до ведения горных работ выше, т.е. произошло перераспределение энергии землетрясений в меньшую сторону (рис. 1). В целом данный график имеет вид линейной функции с постоянным углом наклона.

Следовательно, активное воздействие на геологическую среду вызывает сейсмический отклик в виде изменения уровня сейсмической активности. Под воздействием массовых взрывов происходит изменение количества сейсмических событий и изменение среднего уровня высвобожденной энергии.

Рис. 1. Распределение среднегодовой энергии от землетрясений в радиусе 50 км от производства взрывных работ

Установлено, что очаги техногенных землетрясений либо приурочены к пункту взрыва, либо располагаются северо-западнее вдоль тектонических структур, пересекающих карьерное поле.

Исследования закономерностей наведенной и природной сейсмичности в зоне открытых горных работ устанавливались на материалах 5-ти летних мониторинговых наблюдений Нерюнгринской сейсмостанции (НСС). С 2002 по 2007 гг. за указанный период было произведено более 500 взрывов, зарегистрированных на станции в виде сейсмических событий в среднем 6-го энергетического класса.

Результаты и обсуждения

Анализ по результатам мониторинга за 2002-2007 гг. показал, что из 135 (общее количество 211) зарегистрированных землетрясений в ближней зоне 103 (165 в градусном квадрате) произошли в течение суток после взрывов, причем вблизи технологической площадки зарегистрировано 46 событий. Техногенное воздействие на среду трансформировалось в самостоятельный локальный сейсмический процесс. Иными словами, под действием массовых взрывов инициировался локальный поток сейсмических событий, не коррелированный с моментами взрывов. Пространственное распределение взрывов и землетрясений приведено на рисунке 2.

Рис. 2. Пространственное распределение пунктов взрывов и эпицентров слабых землетрясений ($K < 7$) вблизи технологической площадки Нерюнгринского разреза

✱ – землетрясения 2002 - 2007

◆ 2004

■ 2005

▲ 2006 - взрывы

Это означает, что либо появилась новая активная тектоническая структура, к которой приурочено 165 из 211 землетрясений (78%), произошедших в радиусе 50-ти км от Нерюнгринского разреза, либо активизировался локальный участок Аммунакта-Муастахского и Нижне-Нерюнгринского активных разломов. То есть, сейсмический процесс, инициированный взрывными работами, на локальном уровне приобретает стационарный характер. Таким образом, малоэнергетические импульсные нагрузки на геологическую среду привели к пространственному перераспределению очагов малоэнергетических ($K < 7$) землетрясений (рис. 2).

Из результатов выполненных исследований следует, что активное воздействие на среду вызывает сейсмический отклик в виде не коррелированного изменения сейсмической активности. Под действием энергетических нагрузок на геологическую среду фрагментарно активизируются приповерхностные слои земной коры в зоне динамического влияния Аммунакта-Муастахского и Нижне-Нерюнгринского активных разломов.

Поскольку основной формой геодинамического развития сейсмогенных разломов являются движения их бортов [18] (в виде взаимного «проскальзывания»), а проявление сейсмических событий происходит лишь при невозможности (или затрудненности) развития указанной формы деформации, то есть возникают зоны напряженного состояния земной коры, поэтому, по нашему мнению, сотрясательное воздействие взрывных работ может рассматриваться как фактор, способствующий преобладанию асейсмических форм движения разломов в виде плавного проскальзывания их бортов. Следовательно, воздействие взрывных работ способно не только активизировать разломы вокруг зоны ведения горных работ, но и оказывать разгружающее воздействие на формирующиеся в недрах очаги сейсмической опасности, т.е. перераспределение энергии землетрясений в сторону снижения их энергетического класса.

С 2003 года начаты работы по открытой добыче угля на малых угольных разрезах. Общее энергетическое воздействие их на геологическую среду к 2007 году составило более 10% от воздействия Нерюнгринского угольного разреза [14]. Однако ввод в эксплуатацию в 2013 году разреза «Восточная Денисовка» привел к резкому увеличению количества техногенных землетрясений, до 30 в течении 10 часов после взрыва. По результатам инструментальных наблюдений было установлено, что эпицентры землетрясений, инициированные взрывами, производимыми в разрезе «Восточная Денисовка», в пространстве не совпадают с эпицентрами землетрясений, инициированными взрывами разреза «Нерюнгринский». По результатам мониторинга взрывов и местных землетрясений установлен новый очаг землетрясений (квадрат, выделенный серым цветом), связанный со взрывами на разрезе «Восточная Денисовка» (рис. 3).

Данный участок был детально проанализирован с учетом тектонического строения. Установлено, что наведенная сейсмичность связана с тектоническими структурами, вытянутыми с Севера на Юг, и они пересекают карьерное поле разреза «Восточная Денисовка».

Таким образом, воздействие взрывов на геологическую среду на вновь открывшемся угольном разрезе вызывало сейсмический отклик в виде изменения уровня сейсмической активности, активизируя ранее не проявлявшие себя тектонические структуры, находящиеся в зоне влияния взрывных работ разреза «Восточная Денисовка». Под воздействием массовых взрывов происходит изменение количества сейсмических событий, пространственное распределение эпицентров наведенной сейсмичности, инициированной взрывами, производимыми в разрезе «Восточная Денисовка», приведены на рисунке 4.

Рис. 3. Эпицентры местных землетрясений, зарегистрированных в 2012 -13 гг.

Ж - сейсмособытия

Из результатов сейсмологического мониторинга 2013 года установлено, что эпицентры техногенных землетрясений приурочены к взрываемым блокам массива горных пород или к тектонической структуре, пересекающей карьерное поле с Севера на Юг. Следует отметить, что максимальная активизация наведенной сейсмичности приурочена к взрывам восточного фланга фронта горных работ, на данном участке карьерного поля указанная выше структура вскрыта горными работами.

Рис. 4. Пространственное распределение эпицентров взрывов на разрезе «Восточная Денисовка» и эпицентров техногенных землетрясений

Заключение

Таким образом, нарастание техногенного давления на геолого-геофизическую среду приводит к необратимым явлениям в сейсмическом процессе.

Под воздействием массовых взрывов происходит изменение количества сейсмических событий и изменение среднего уровня высвобождаемой энергии. Активное воздействие на геологическую среду вызывает сейсмический отклик в виде формирования техногенных землетрясений, активизируя сейсмогенерирующие структуры, расположенные в зоне влияния промышленных взрывов.

Сейсмический процесс, инициированный взрывными работами, на локальном уровне приобретает стационарный характер, малоэнергетические импульсные нагрузки на геологическую среду приводят к пространственному перераспределению очагов малоэнергетических ($K < 7$) землетрясений. Взрывные работы способны не только активизировать разломы вокруг зоны ведения горных работ, но и оказывать разгружающее воздействие на формирующиеся в недрах очаги сейсмической опасности, т.е. перераспределение энергии землетрясений в сторону снижения их энергетического класса.

1. Imaeva L. P., Koz'min B. M., Imaev V. S., Grib N. N., Ashurkov S. V. Seismotectonic destruction of the Earth's crust in the zone of interaction of the northeastern side of the Baikal rift and the Aldan-Stanovoy block // *Journal of Seismology*, 2017. Vol. 21. No 2. P. 385–410. DOI: 10.1007/s10950-016-9607-3.
2. Гамбурцев А. Г., Гамбурцева Н. Г., Галкин И. Н., Николаева Р. В., Олейник О. В. Наведенные процессы в литосфере: Наведенная сейсмичность. М., Наука, 1994. – С. 16 – 40.
3. Николаев А. В. Иницирование землетрясений подземными ядерными взрывами: Вестник РАН, 1993, Том 63, №2. – С. 113 – 116.
4. Адушкин В. В., Тур'унтаев С. Б. Техногенная сейсмичность – индуцированная и триггерная. – М.: ИДГ РАН, 2015. – 364 с.
5. Николаев А. В., Верещагин А. Г. М. Об инициировании землетрясений подземными ядерными взрывами. ДАН СССР, 1991, т. 319, №2, с. 333-336.
6. Wong I. G. Potential Injection-Induced Seismicity Associated with Oil & Gas Development: A Primer on Technical and Regulatory Considerations Informing Risk Management and Mitigation. 2015. P. 141. URL: <http://www.gwpc.org/sites/default/files/finalprimerweb.pdf> (дата обращения: 05.10.2016).
7. Grib N. N., Syasko A. A., Imaev V. S., Grib G. V., Kachaev A. V. Change in the Physical Properties of Rocks Resulting from Quarry Blasts in South Yakutia // *Seismic Instruments*, 2018, Vol. 54, No. 1, pp. 101–112. DOI: 10.3103/S0747923918010048
8. Кузьмин Ю. О., Жуков В. С. К 89 Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород. – 2-е изд. – М.: Горная книга, 2012 - 264 с.
9. Ананьин И. В. К вопросу о проявлении некоторых землетрясений в восточной части Восточно-Европейской платформы. Исследования по сейсмической опасности // Вопросы инженерной сейсмологии. 1988. № 29. С. 119–124.
10. Анциферов А. В., Майборода А. А., Савченко А. В., Туманов В. В. Обоснование геофизических исследований в угледобывающих регионах подверженных активизации геодинамических процессов // *Transactions of UkrNDMI NAN Ukraine*, 2012. № 11. С. 251 – 266.
11. Ellsworth, W.L. Injection-Induced Earthquakes // *Science*. 2013. Vol 341. №6142. P. 142 – 143. doi: 10.1126/science.1225942
12. Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В., Лескова Е. В., Шевкунова Е. В., Подкорытова В. Г. Техногенная сейсмичность разрезом Кузбасса (Бачатское землетрясение 18 июня 2013 г.) // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 2. – С. 41–46.
13. Еманов А. Ф., Еманов А. А., Лесков Е. В., Фатеев А. В., Семин А. Ю. Сейсмические активизации при разработке угля в Кузбассе // Физическая мезомеханика. – 2009. Т. 12. - № 1. – С. 37 – 43.
14. Грив Г. В., Грив Н. Н. Проявление техногенной сейсмичности в Южной Якутии // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16. № 1(3). С. 636–640.
15. Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В. Бачатское техногенное землетрясение 18 июня 2013 г. с $M_L=6.1$, $I_0=7$ (Кузбасс) // Российский сейсмологический журнал. – 2020. – Т. 2, № 1. – С. 48–61. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.05>
16. Сычев В. Н. Исследование влияния импульсных энергетических воздействий на вариации пространственно-временных распределений сейсмичности на территории Северного Тянь-Шаня : автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук: специальность 25.00.10 / Сычев Владимир Николаевич; [Ин-т физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН]. - Москва, 2008. - 27 с.
17. Woodward K., Wesseloo J. Observed spatial and temporal behaviour of seismic rock mass response to blasting // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2015. Vol. 115. No 11. P. 1044–1056. doi: 10.17159/2411-9717/2015/v115n11a9
18. Грив Н. Н., Грив Г. В., Имаев В. С., Терещенко М. В. Изменение состояния массива горных пород от импульсных нагрузок промышленных взрывов // Горный журнал - №10, 2016. – С. 31–34. DOI: 10.17580/gzh.2016.10.05